

半導体・液晶表示体製造におけるエネルギー生産性向上に関する研究

著者	川端 洋成
号	2807
発行年	2001
URL	http://hdl.handle.net/10097/8080

氏 名	かわ ばた よう せい
授 与 学 位	川 端 洋 成
学位 授与 年 月 日	博士（工学）
学位授与の根拠法規	平成 14 年 3 月 25 日
研究科、専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電子工学専攻
指 導 教 官	半導体・液晶表示体製造におけるエネルギー生産性向上に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 大見 忠弘
	主査 東北大学教授 大見 忠弘 東北大学教授 坪内 和夫
	東北大学教授 高橋 研 東北大学助教授 須川 成利

論文内容要旨

第1章 序論

本研究の背景と目的

半導体、液晶表示体は生産コスト低減とチップ性能の向上のためウエハの大型化とパターンの微細化が進み、工場は巨大化と複雑化の一途を辿って来た。その結果としての工場建設費用の巨額化、莫大なエネルギー消費は深刻な問題となっている。また発展途上国との価格競争に晒され、国内生産品は一層の高性能、高品質のみならず工場建設費の圧縮、生産の小ロット化、短納期化がますます強く求められる事になる。このような工場、生産ラインを実現するためには建物、生産装置を含めて工場全体の最適化が求められ、多種多様な関係者が同じ理解に立って共同歩調を取る事が必須である。そのため「エネルギー消費」の側面から工場全体を解析し、誰にも理解しやすい共通言語として、また進化を刺激するために性能評価指標と性能改善指針を提案する。

製品のコスト構成とエネルギーコストの影響

製品コストの主要因は 第1に工場、設備の償却費用であり第2はガス、薬液の費用、第3に労務費が続く。電力費用などのエネルギーコストは5%にも満たない。ここでエネルギーコストの重要性が低いと考える事は極めて大きな誤りである。過去に発生したオイルショックの事例では原油、LNGなどの価格が数倍に上昇し、これによりプラスチックなど化石原料による製品価格が上昇し、最後に電気製品など全ての最終製品のコスト上昇をもたらした。

エネルギー輸入割合

原油等のエネルギーや原料の自給率は20%程度である。ひとたびエネルギー価格の上昇があると全てのコストを押し上げ、国際的な価格競争力を喪失する事を認識する必要がある。

各国の費用比較と海外生産の効果

低労務費国に生産を移転すると労務費に依存する費目では直ちに優位性が得られる。生産財など先進国からの輸入に依存する物は順次その国で生産され費用も現地化されて行く。現地化が進むにつれ、人件費などが上昇する為、国土 人口の容量が小さい国では比較的短期間にコスト優位性を失うが、大容量の地域では長期にわたって競争力を維持できる。国内生産においてはこの差を凌ぐための進化努力が必要である。

第2章 工場のエネルギー消費調査と解析

1ヶ月の実測結果では生産装置の電力消費が35%、工場設備の消費が65%であった。これからは有為な分析が出来ないため、12ヶ月にわたり測定したところ生産装置の稼動状況に関わらず建物がエネルギーを消費していること、冬でも冷凍エネルギーが大きいことなどが判明した。さらには生産装置の規模に比較してこの建物の

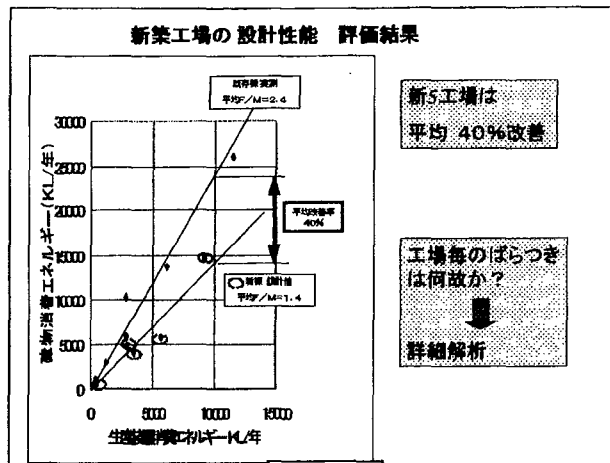


図1

のエネルギー消費は適切なものか等の疑問点が浮かび上がった。工場新設にあたっては建設会社からは建物の構造図を基に懇切な省エネ対策の説明があったがその用語は専門外の者には理解する事が出来ず、上記の疑問点にも解を得られなかった。このため誰にも理解できる性能評価指標として建物の消費エネルギーと生産装置の消費エネルギーの比をとったものを考案した。(図1)これは簡明であった為 工場建設部門、建設会社双方に理解され 採用された。しかしこの方法は概略性能の把握には適するが細部の性能を説明する事ができないため詳細な分析手法が必要となった。

第3章 等価回路による詳細解析

負荷別エネルギー性能評価指標

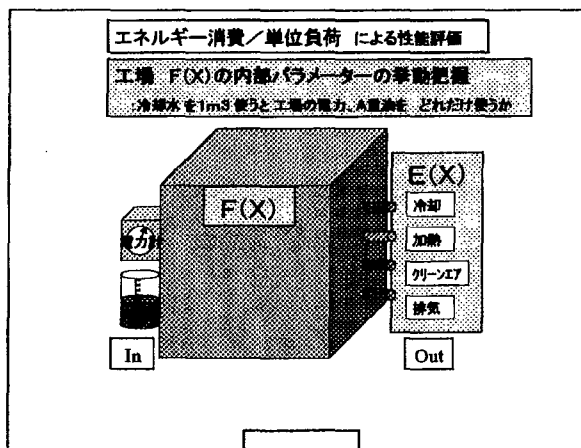


図2

図2に示すように工場を一つの関数と見做し、電力と重油を関数への入力、排気、冷却水などを出力とみなして関数の特性を解析する事を試みた。構造図 機器配置図 配管図に加え熱設計書を連立させ、設計情報を「熱量の流れ」「熱媒体搬送抵抗」「機器接続、動力」に区分した等価回路を考案した。(図3)

この等価回路により排気、冷却水など 負荷毎に建物が消費するエネルギーを算出できた。(図4)

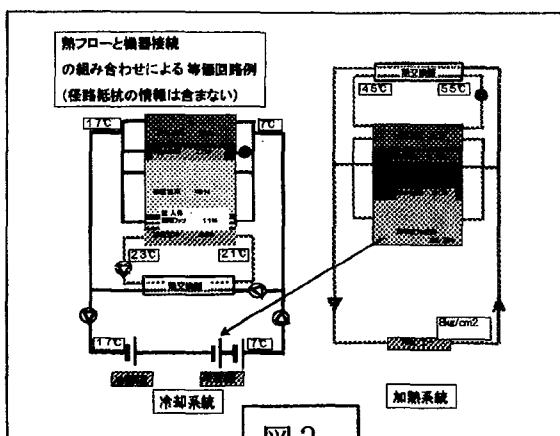


図3

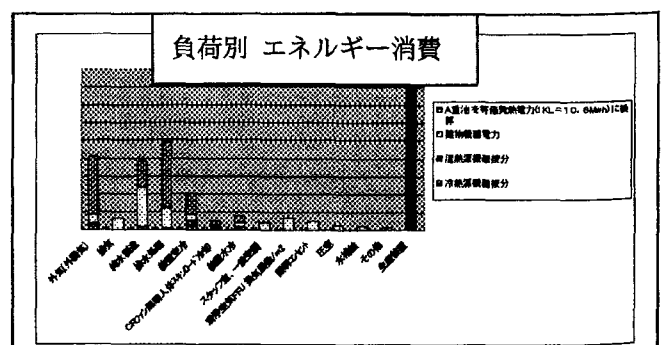


図4

空冷性能、水冷性能の評価指標

等価回路によってクリーンルームの空冷性能と水冷性能の比較解析を行った。設計情報の解析ではクリーンルームの発熱処理は全体の2/3を空冷に依存していた。冷凍機の評価方法に用いられているCOP(成績係数=冷却熱量/圧縮機の動力)の考え方を利用して空冷と水冷のエネルギー性能を評価すると空冷のCOPが2.9、水冷では2.1となり空冷が優れていると言う意外な結果が得られた。この原因を解明するため水と空気の物性を比較したところ熱伝導率、比熱、比重、動粘性率などあらゆる点で水のほうが媒体として優れていたが径路抵抗が水においては空気の6000倍以上大きいため水の優位性が打ち消されている事が判明した。

熱源設計の評価

熱源設計を評価した例ではターボ冷凍機、吸収式冷凍機の運転が年間を通じて平準化されていないことが判明し過剰な余裕が生じている事が窺えた。これの対策としてフリークーリング、生産装置の廃熱を組み合わせる利用することにより運転の平準化と設備能力を低く出来る条件がある事を見出し得た。

冷却、造排水、排気のエネルギー削減指針

冷却エネルギーの削減指針を得るためエネルギー消費を冷却系と加熱系に再区分した。これらはさらに熱源のエネルギーと搬送エネルギーに区分される。空気の搬送エネルギーとはFFUを経た空気がグレーチングを通り、装置の背後を通過してFFUに帰るまでの径路における空調機のファン動力である。これを削減するには 巨大な空気径路を限りなく小さな空間とし、攪拌エネルギーを不要とする事が有効である。水冷における搬送エネルギーは冷却水を水槽から生産装置まで送り届けるためにポンプが消費するエネルギーをさす。これを削減するには往復100mもある配管の長さを極少にする事が有効である。これらの対策を組み合わせた冷却システムによってクリーンルームの冷却エネルギーは現状の40%にまで削減する事が期待できる。

造排水設備のエネルギー消費は 源水、排水の加熱と攪拌ポンプの動力でありエネルギーの消費構造はシンプルである。このため大幅なエネルギー削減には 生産装置側で純水、排水などの量を削減する以外に方法は無いと考える。

スクラバーなどの排気設備のエネルギー消費は僅かであるが排出した分を補うために外調機が作動し、冷凍機、ボイラー、ポンプ等も連動して作動するため全体として大きなエネルギーを消費する。これを削減する簡易な方法として外調機経由の空気ではなければならない空気使用を極小にし、大半の空気使用は外調機を経由しない空気で行う事が考えられる。これには生産装置内部の工夫が必要である。

建物のまとめ

建物を解析した結果、各種のエネルギー性能評価指標を得たが今後いかなる方向に進むべきかを見出し得た。すなわちエネルギーの集中供給、環境の一括制御から分散独立型の工場へ脱皮する事により大幅な進化が可能になると言える。この時に必要となる技術開発テーマも見えてきた。

第4章 生産装置のエネルギー消費調査と解析

装置電力実測

解析に先立ち生産装置の電力実測を行った実測平均電力/定格値 は全体で12%以下でありこれを基に冷却設備の設計をしたとすれば大きな無駄をする事となる。装置別では真空装置の使用割合が54%と最大であった。真空装置の内訳はドライポンプ、高周波電源、温度制御などである。

生産装置の連結エネルギー消費と性能評価指標

先に調べた単位負荷あたりの建物のエネルギー消費値に装置負荷を乗ずると各生産装置による建物の消費エネルギーを求められる。この結果WET系の例では装置自身の電力消費は僅かであるが純粋製造、排水処理など建物に要求するエネルギーが極めて多い事などが判明した。(図5)

すなわち生産装置のエネルギー性能を評価するには建物のエネルギー消費を連結させる事が必須と言える。

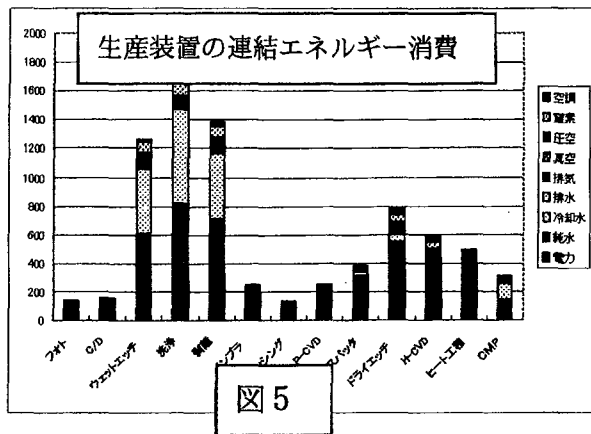


図 5

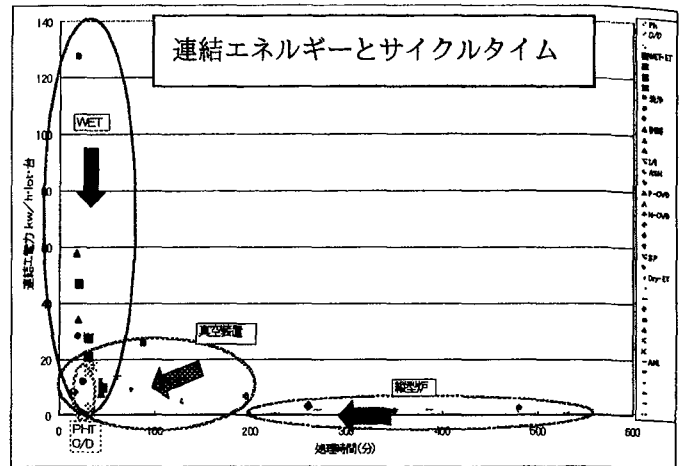


図 6

製品の連結エネルギーとサイクルタイム

実際の生産では装置が稼動する時間がすべて異なるため特定の製品について各工程の単位時間当たりの連結エネルギーPとサイクルタイムTを調査した。(図6) WETは連結エネルギーが大でサイクルタイムが小、縦型炉は連結エネルギーが小でサイクルタイムが長大であった。生産エネルギーとは単位時間あたりの「連結エネルギー×サイクルタイム」であるからWETではPを、縦型炉においてはTを中心に削減する事が必要となる。

代表的生産装置のエネルギー性能評価指標

WET系の薬液、純水の使用効率を調べたところ1/千～1/1万であった。現状から一桁程度の改善は十分可能と言える。縦型炉ではTが重要なためウェハが装置内で処理される時間 τ を調べたところ $\tau/T=0.075$ であった。真空装置では高周波電源、温度制御、ドライポンプの仕事効率が1/100～1/1万、ガスの使用効率は1/10万と極めて低い。生産装置の性能評価指標として効率と τ/T を設定し、進化を刺激したい。

生産装置のまとめ

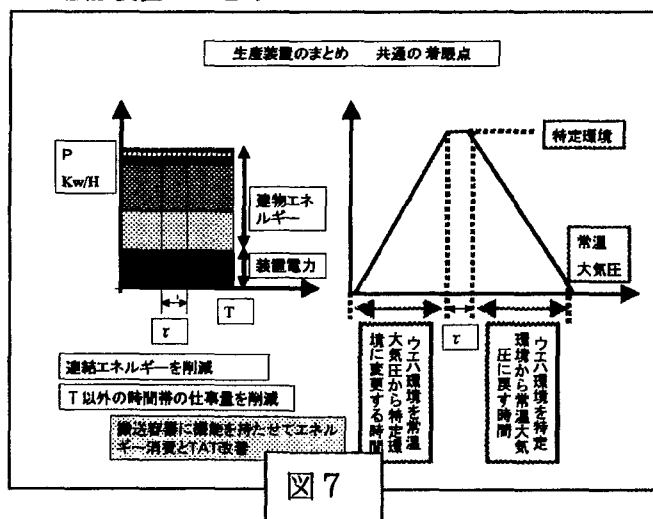


図 7

単位時間あたりの連結エネルギーとサイクルタイムに着眼する事により装置毎の生産エネルギー削減指針が得られる。(図7) また 連結エネルギー、ガス、薬液、イニシャルコストなどが τ 以外の時間帯に大半が消費されている。 τ/T が0.075～0.2である事に鑑みると生産エネルギー、TATともに1/10に削減する事は十分可能性があるとと言える。またガス、薬液、純水の使用効率が極端に悪いため これを一桁改善する事は可能性が大であり、総合すると工場全体のエネルギー生産性(連結エネルギー消費、TAT、ランニングコスト等を1/10以下に圧縮する事は十分可能である。

第5章 結論

巨大ブラックボックスである半導体、液晶表示体 製造工場の諸課題に対し、エネルギー消費構造を解析することによりその性能評価と改善策の方向を見出す事が出来た。建物の解析は等価回路を考案する事によりこれを可能にした。生産装置は自身の電力消費だけでなくその装置負荷が建物に要求する仕事と関連させた「連結エネルギー消費」の把握方法を見出した。また「生産エネルギー」=「単位時間当たりの連結エネルギー消費」×「工程サイクルタイム」と見なすことにより性能評価指標とともに性能改善の方向を見出す事が出来た。

以上

論文審査結果の要旨

半導体、液晶表示体は生産コスト低減と製品性能の向上のため基板の大型化とパターンの微細化が進み、その工場は巨大化と複雑化の一途を辿って来た。その結果として工場の建設費用が巨額なものとなり且つ莫大なエネルギー消費をもたらしていることが深刻な問題となっている。また他の製品と同様に半導体、液晶表示体も大量生産によるスケールメリットを享受し得えた時期は過ぎ、過当競争と価格低下をもたらしている。このためわが国で強い価格競争力をもった製品を製造していくには一層の高性能、高品質を求められるばかりで無く工場建設費の圧縮、生産の小ロット化、短納期化がますます強く求められる事になる。これらを解決した工場、生産ラインを実現するためには工場全体の最適化が求められ、多種多様な関係者が同じ理解に立って共同歩調を取る事が必須である。そのため本論文ではこれまで無視されてきた「エネルギー消費」の側面から工場全体を分析し、理解しやすい共通言語としての性能評価指標を提案している。これによって関係分野の多くの人々が適切な方向へ向かって行動する事を可能にしている。また、独自の試みとして建物のエネルギー消費を生産装置の仕様と連結させ、且つ複雑なエネルギー消費構造を等価回路によって解明している。これらは目前の建物、生産装置の性能評価や選定を容易にするばかりでなく今後の建築技術開発、生産装置開発の指針を確かなものにするために有益な研究成果である。本論文は、これらの成果を取り纏めたものであり、全文5章からなる。

第1章は序論としてエネルギー過剰消費のリスクについてコストの面から概説している。

第2章では工場のエネルギーを実測し、第3章では消費構造分析にあたり新規な手法として熱設計情報、構造設計情報等の設計情報を連立させた等価回路を用いて解析を行っている。これは複雑を極めた工場や生産装置のエネルギー消費構造を簡単に解析する事を可能としておりきわめて有用な手法である。この等価回路を用いた評価事例として①機能別の建物エネルギー消費および単位負荷あたりの建物エネルギー消費 ②クリーンルームの空冷性能と水冷性能の比較評価 ③熱源設計の評価を挙げている。対策事例としては①冷却エネルギー削減 ②造排水エネルギー削減③排気エネルギー削減の考え方について述べている。また今後の進化に有用な開発テーマの提案をまとめている。これらはブラックボックスであった工場を異分野の立場でも理解でき、進化の方向を正しく理解するための有益な情報を提供する研究成果である。

第4章は生産装置について調査 分析を行っている。最初の調査により生産装置の実測電力と定格電力の比が1/2程度と極めて大きな差がある事から装置設計者のエネルギー問題に対する習慣を読み取り、以降の分析作業の方向を定めている。すなわち生産装置がユーザーの工場に設置された時、装置が要求する排気、冷却、純水などによって工場がどれだけエネルギーを消費しているか、コスト負担は如何ほどかについて正しい認識を持つ様に装置仕様と建物のエネルギー消費を連結した性能評価指標を提案している。これは装置メーカーにとってこれまで目にする事が無かったものであり今後の装置開発指針として有益なものとなっている。一方、装置の電力消費とその効率調査例を示している。結果は1/1,000~1/100,000 という驚くべき結果である。このため提案するところのエネルギー効率、時間の効率、ガス 薬液の使用効率を性能評価指標として用い、開発を進めるならば エネルギー消費のみならずランニングコスト、生産期間、装置価格、工場のサイズなどあらゆる面に波及効果が大きく、きわめて重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、半導体・液晶表示体製造における重要課題をエネルギー生産性に基づいて解析し、簡明な指標によって工場トータルの性能評価を可能にすると同時に、今後の生産に係る装置・ユーティリティの開発指針をも提示したものであり、半導体・画像電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。